

DIVISORES WILKINSON CON ELEMENTOS CONCENTRADOS PARA PROCESADO DE PULSOS

Luis A. Tejedor Álvarez⁽¹⁾, José I. Alonso⁽²⁾, Juan Abel Barrio Uña⁽¹⁾,
luistejedor@gae.ucm.es, ignacio@gmr.ssr.upm.es, barrio@gae.ucm.es

⁽¹⁾Dpto. de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad Complutense de Madrid.
Facultad de CC Físicas, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid.

⁽²⁾Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid.
ETSI Telecomunicación, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid.

Resumen—Some photodetectors like PMTs and SiPMs give pulses of few nanosecond width at their outputs, which need to be properly processed with analog circuits. Power splitters with two and three outputs are required to distribute this kind of fast pulses equally among different outputs. Good matching and low pass response are necessary to avoid shape deformation, which discard low frequency designs with operational amplifiers. To match these requirements two Wilkinson dividers were designed, substituting the λ quarter lines for lumped elements. These changes provide us with low pass response and much smaller size, using SMD devices. The splitters were manufactured and measured, with good results.

I. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la transmisión de señales analógicas de gran ancho de banda en banda base no ha tenido un gran desarrollo. La estrategia utilizada típicamente consistía en modular estas señales para transmitir las en frecuencias de RF o microondas, donde la disponibilidad de ancho de banda es bastante mayor. Así se hacía, por ejemplo, en los primeros enlaces por satélite en los que muchas señales analógicas multiplexadas se transmitían a frecuencias de pocos GHz. Posteriormente el desarrollo de la tecnología Ethernet permitió alcanzar velocidades de transmisión del orden de Gbps en banda base, muy útiles para señales digitales pero poco adecuadas para la comunicación de señales analógicas donde la forma de la señal es importante y no se puede recurrir a técnicas como utilizar varios pares de hilos en paralelo. Las fibras ópticas sí permiten transmitir señales analógicas en banda base y de gran ancho de banda, simplemente modulando la intensidad de luz emitida por un láser o un LED, si bien es cierto que la gran mayoría de las fibras están optimizadas para transmisión digital.

Sin embargo, existen aplicaciones en las que se trabaja con pulsos en banda base, que pueden ser muy cortos y cuya forma contiene información. Este caso se da, por ejemplo, en todas aquellas aplicaciones que utilizan sensores ópticos altamente sensibles como fotomultiplicadores tradicionales (PMTs) [1] o de Silicio (SiPMs), en los que el objetivo es distinguir cuántos fotones han llegado al detector y en qué instante lo hicieron, y ello sólo puede hacerse a partir de la forma de la señal. La salida de este tipo de detectores de fotones consiste en pulsos con anchuras del orden de 2.5 ns o incluso menos, que se producen cada vez que detectan un fotón, y

cuya amplitud aumenta en saltos discretos según el número de fotones que llegan.

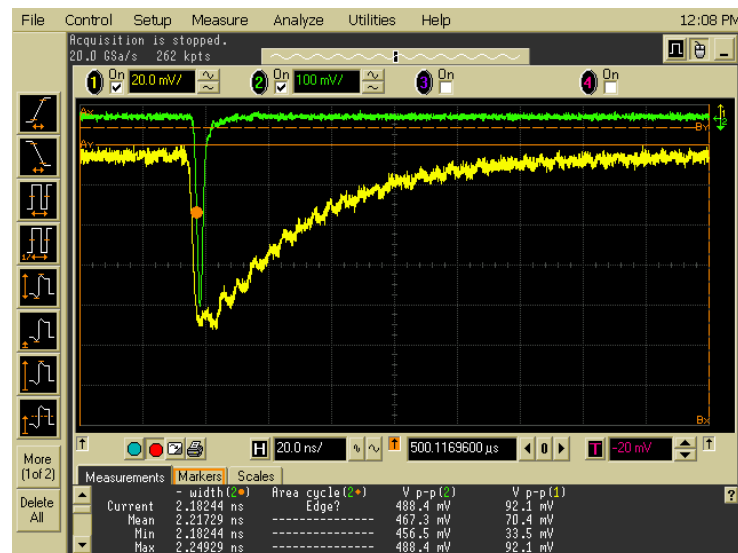


Fig. 1. Pulso a la salida de un PMT (verde) y de un SiPM (amarilla).

Este tipo de detectores ópticos se utilizan en las aplicaciones en las que se requiere la detección de destellos de luz muy débiles y muy rápidos. Una de estas aplicaciones es la detección de partículas subatómicas ionizantes que en su interacción con el medio material del detector emiten fotones ópticos. De este modo, los fotomultiplicadores son utilizados habitualmente para detectar radiaciones ionizantes en aplicaciones médicas (tomografías, gammagrafías, etc), detección de grietas en construcciones, o también para detectar cascadas de luz Cherenkov producidas por rayos gamma de origen cósmico mediante telescopios especiales como MAGIC [2] o el futuro CTA [3]. En el marco del proyecto CTA, se han desarrollado diversos circuitos como los presentados en este artículo, que permiten realizar diferentes operaciones con pulsos muy rápidos generados por PMTs.

Si se analiza el espectro de los pulsos generados por un PMT se observa que, para una anchura típica de 2.5 ns la potencia se distribuye desde frecuencias bajas hasta aproximadamente 800 MHz. A estas frecuencias ya resulta imprescindible una buena adaptación de impedancias para impedir

que haya pulsos reflejados propagándose por el sistema. Para conseguirlo las técnicas de RF y microondas, adecuadamente modificadas para conseguir un funcionamiento paso bajo, resultan de gran utilidad.

II. DIVISORES

Con el objetivo de distribuir los pulsos generados en PMTs entre diversos subsistemas del telescopio CTA, se han diseñado dos divisores, uno de ellos de 2 ramas y otro de 3, de forma que a partir de un pulso de entrada se obtengan 2 ó 3 a la salida, con una distribución equitativa de la potencia de entrada entre las salidas y las menores pérdidas posibles. Asimismo, también es necesaria una correcta adaptación de impedancias tanto en las entradas como en las salidas.

La primera solución, típica del procesado de pulsos algo más lentos, consistió en utilizar 2 amplificadores operacionales rápidos como el AD8003 en configuración de seguidor de tensión y con una resistencia de adaptación en la entrada, conectados como en la figura 2

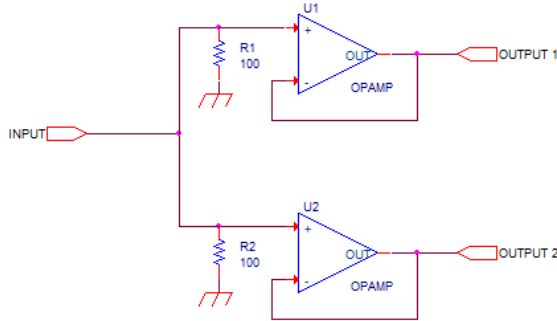


Fig. 2. Divisor con 2 amplificadores operacionales en *buffer*

Esta solución, si bien tiene algunas ventajas como proporcionar en las salidas pulsos idealmente de la misma amplitud que en la entrada, no ofreció buenas prestaciones en cuanto a adaptación, además de requerir 2 amplificadores operacionales rápidos y también por ello caros y con un consumo alto.

La siguiente idea fue utilizar un divisor de Wilkinson como los típicamente utilizados en microondas [4]. Sin embargo estos tienen 2 problemas fundamentales: en primer lugar, presentan una respuesta de tipo paso banda, con lo cual no permiten pasar las bajas frecuencias de los pulsos. Y en segundo lugar, las ramas de longitud $\frac{\lambda}{4}$, aún suponiendo una frecuencia máxima de 800 MHz y un sustrato FR4 con $\epsilon_r = 4,5$ y 1.5 mm de grosor, tendrían una longitud de más de 5 cm, demasiado grande para la aplicación en cuestión.

Sin embargo, es conocido que una línea de transmisión puede modelarse con un circuito equivalente en π . Por lo tanto, si se sustituyen las líneas de $\frac{\lambda}{4}$ por sus circuitos equivalentes con elementos concentrados, se puede realizar el divisor de Wilkinson completo con elementos discretos [5].

Construyendo el divisor de este modo, no sólo se consigue reducir drásticamente el tamaño empleando componentes de montaje superficial, sino que además la respuesta se vuelve paso bajo. Así, la respuesta de los divisores de Wilkinson realizados con elementos concentrados es perfecta para dividir señales paso bajo como los pulsos cortos generados por un PMT. En los apartados A y B pueden verse los resultados de

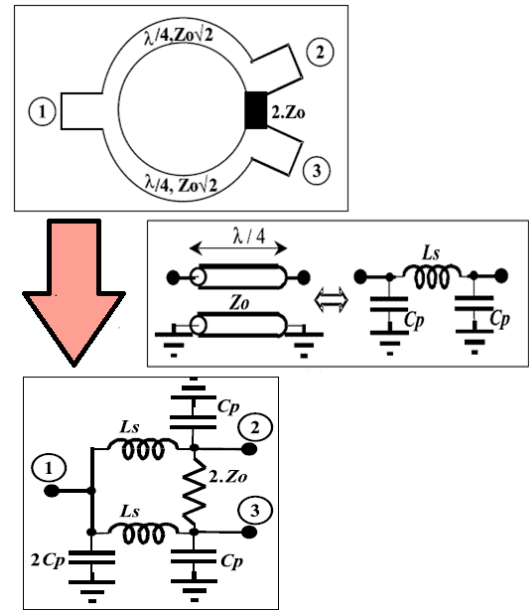


Fig. 3. Paso de divisor de Wilkinson clásico a elementos concentrados

simular los divisores de 2 y 3 salidas respectivamente, con las respuestas paso bajo previstas.

A. Divisor de 2 ramas

Después de optimizar para obtener los valores comerciales de bobinas y condensadores que permitiesen una respuesta con las menores pérdidas, lo más plana en frecuencia y con la mejor adaptación posibles, se llegó al diseño de la figura 4, con los valores de la tabla I y la respuesta simulada de la gráfica 5.

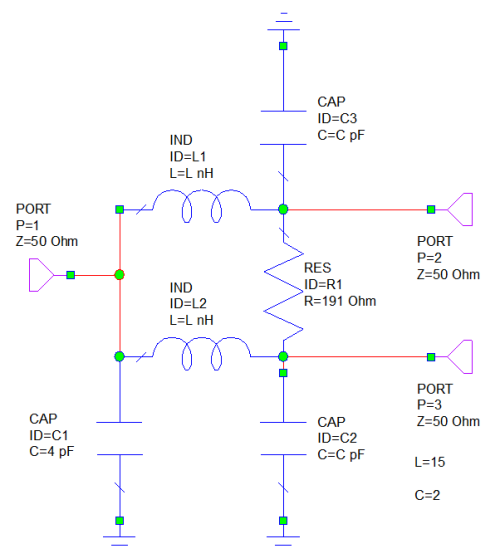


Fig. 4. Esquema circuital del divisor de 2 ramas

| Divisor 2 ramas | |
|-----------------|-------------|
| L | $15nH$ |
| C | $2pF$ |
| R | 191Ω |

Tabla I. Valores de los elementos del divisor de 2 ramas

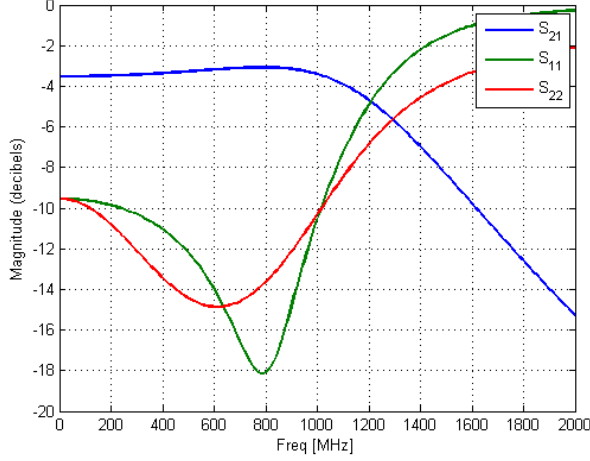


Fig. 5. Respuesta simulada del divisor de 2 ramas

| Divisor 3 ramas | |
|-----------------|------------|
| C_{in} | $5,6pF$ |
| L | $20nH$ |
| C | $2pF$ |
| R | 50Ω |
| C_{ajuste} | $1pF$ |

Tabla II. Valores de los elementos del divisor de 3 ramas

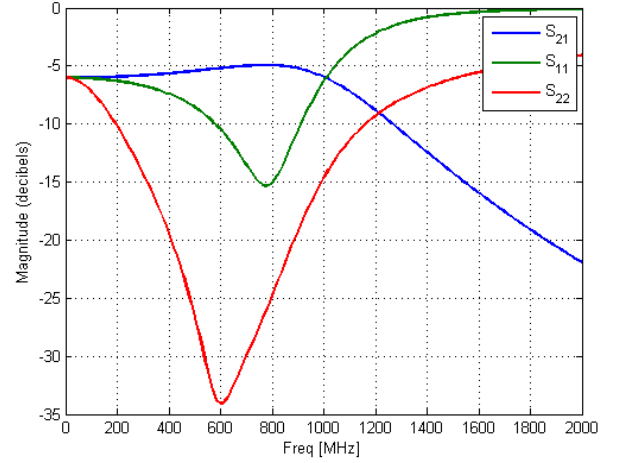


Fig. 7. Respuesta simulada del divisor de 3 ramas

B. Divisor de 3 ramas

Del mismo modo, se diseñó el divisor de 3 ramas, con la única novedad de que las 3 resistencias de salida están conectadas a un condensador de 1 pF a masa para ajustar la adaptación, como puede observarse en la figura 6. Los valores de los elementos están recogidos en la tabla II y la respuesta simulada del circuito en la gráfica 7.

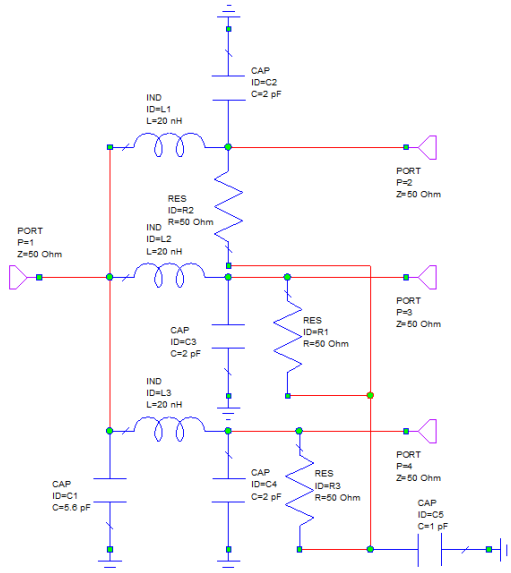


Fig. 6. Esquema circuital del divisor de 3 ramas

Dado que el circuito ideal simulado es completamente simétrico, en las gráficas de las simulaciones sólo se ha representado la transmisión a una de las ramas y la adaptación en una de las salidas.

III. CONSTRUCCIÓN Y MEDIDAS

El sistema en que están integrados los divisores diseñados en el apartado II fue construido en una PCB de 8 capas con 0.13 mm de sustrato FR4 con $\epsilon_r = 4,5$ entre cada 2 capas. Sin embargo, antes de construir el sistema completo, se realizaron dos placas de prueba para caracterizar los divisores de 2 y 3 ramas por separado. Estas placas de prueba se realizaron también con sustrato FR4, pero en este caso de 1.5 mm de espesor y con sólo 2 capas (figuras 8 y 9).

El sustrato FR4 de 1.5 mm de espesor es adecuado para las frecuencias a las que se utiliza el circuito, pero al ser tan grueso el ancho de la línea de 50 Ω son 2.82 mm, lo que causa problemas a la hora de soldar los pequeños componentes SMD. En consecuencia, fue necesario estrechar las líneas en las cercanías de los componentes, lo que puede degradar algo la adaptación si se compara con la respuesta que se obtiene en el sistema final, para el que la línea de 50 Ω tiene una anchura de 0.245 mm.

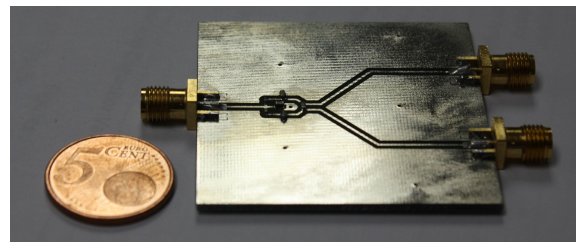


Fig. 8. Foto del divisor de 2 ramas construido

Por otro lado, los conectores utilizados han sido de tipo SMA convencional, que al ser un estándar capaz de funcionar hasta 18 GHz permite operar correctamente a las frecuencias de trabajo.

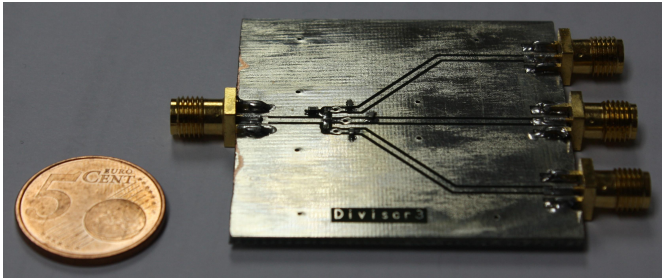


Fig. 9. Foto del divisor de 3 ramas construido

Los dos circuitos fueron caracterizados con un analizador vectorial de redes obteniéndose las medidas presentadas en las gráficas 10 y 11.

Si se compara con las simulaciones, puede verse que la respuesta medida tiene algunas diferencias con la esperada. En el caso del divisor de 2 ramas (fig.10), llama la atención la caída tan abrupta que presentan el $|S_{21}|$ y del $|S_{31}|$ a partir de 1 GHz. Al estar más allá de las frecuencias ocupadas por el espectro del pulso no es un problema grave, sino más bien una ventaja añadida al divisor, que filtrará el ruido de frecuencias superiores. Algo similar ocurre en el divisor de 3 ramas (fig.11) cuya frecuencia de corte podríamos situar en torno a 800 MHz. Asimismo, en ambos divisores se observa que las adaptaciones son algo peores de lo esperado. Estas diferencias observadas entre simulaciones y medidas, probablemente hayan sido causadas por múltiples efectos parásitos no tenidos en cuenta en la simulación, hecha con elementos ideales. Así, por ejemplo, en las simulaciones no se han tenido en cuenta las transiciones conector a microstrip, ni las discontinuidades de las líneas ni los efectos parásitos de los componentes SMD. No obstante, para las frecuencias de trabajo la respuesta obtenida con los divisores construidos es aceptable, si bien es cierto que si se desearan simular estos diseños a frecuencias superiores sería imprescindible recurrir a modelos de simulación más precisos y adecuados para alta frecuencia [6].

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido realizado gracias a la financiación del MICINN a través de los proyectos titulados "Centro de Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear" CSD2007-00042 y "Contribución española al estudio de diseño y el prototipado del Cherenkov Telescope Array" FPA2009-14226-C05-0.

REFERENCIAS

- [1] Leo W.R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* Springer-Verlag, 1994
- [2] Experimento MAGIC, "Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope" "Online: <http://www.magic.mppmu.mpg.de/index.es.html>
- [3] Proyecto CTA, "Cherenkov Telescope Array" "Online: <http://www.cta-observatory.org/>
- [4] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley and Sons, inc. 1998.

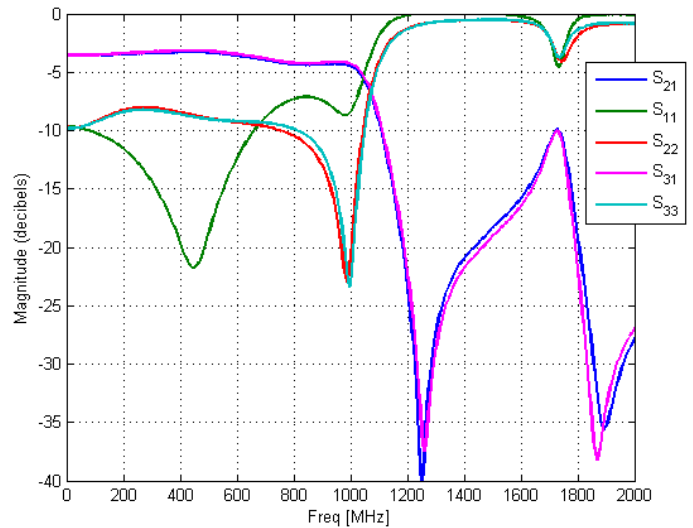


Fig. 10. Medidas del divisor de 2 ramas

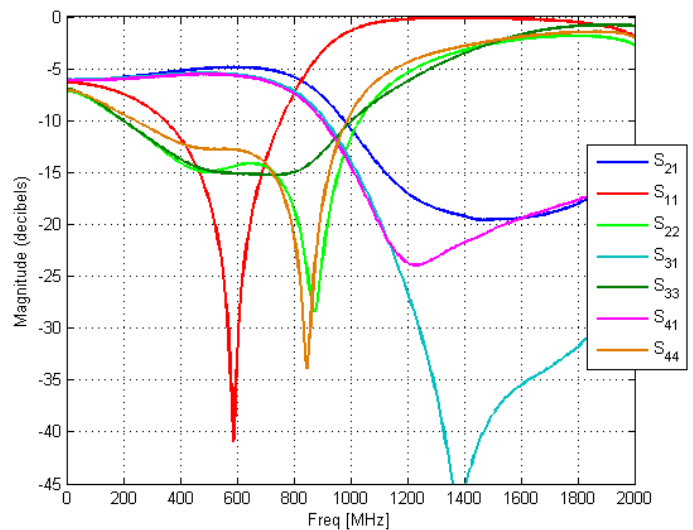


Fig. 11. Medidas del divisor de 3 ramas

- [5] F. Noriega and P.J. González, "Designing LC Wilkinson Power Splitters" *Mobile Dev and Design*, Aug. 2002.
- [6] Luis A. Tejedor Álvarez, *et al.* "Circuitos Equivalentes en Bandas Milimétricas" XXII Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2007. Tenerife, Septiembre 2007
- [7] Peter Vizmuller, *The RF Design Guide*, Artech House, 1995.